

O.I. СУХАНОВА, O.O. ЛАРИН

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЛАМІНОВАНИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ РІЗНОЮ КРИВИЗНОЮ СКЛА ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У статті представлені результати аналізу динамічного стану композитів ламінованих стекел при ударному навантаженні. Розглянуто моделювання падіння гладкої сталеві кулі на ламіноване скло з різною його кривизною. В якості граничних умов було зафіксовано ламінат з двох сторін, а удар кулі було змодельовано у центрі пластини. У роботі композит моделювався в тривимірній постановці в рамках фізичної лінійно-пружної постановки. Взаємодія кульки та композиту проводилась у рамках вирішення задачі одностороннього контакту за алгоритмом «поверхня до поверхні». Опором, що надається повітрям під час удару, нехтували. Метою роботи було дослідження залежності динамічної деформації ламінованих стекел від кривизни скла. Поведінка впливу зразків ламінованого скла з PVB прошарком моделювалася за допомогою перехідного аналізу. Дослідження було проведене з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), із використанням гексагонального 8 вузлового скінченного елемента зі 3 ступенями волі в кожному, у рамках 3D-моделювання та явного динамічного підходу в сучасному програмному забезпеченні комп'ютерного інженерного аналізу (CAE). Виконано аналіз збіжності розміру сітки. У статті було проаналізовано динамічні деформації та напружений стан у ламінованих стеклах при різних параметрах кривизни ламінату, виведено результати прогинів, напружень та деформацій у характерних точках у різні моменти часу, побудовано графіки залежності прогинів та деформацій від параметру кривизни скла.

Ключові слова: ламіноване скло, ударне навантаження, полівініл-бутиральний прошарок, явна динаміка, напружено-деформований стан.

O.I. СУХАНОВА, A.A. ЛАРИН

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЛАМИНИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КРИВИЗНОЙ СТЕКЛА ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ

В статье представлены результаты анализа динамического состояния композитов ламинированных стекел при ударной нагрузке. Рассмотрено моделирование падения гладкого стального шара на ламинированное стекло с разной его кривизной. В качестве граничных условий было зафиксировано ламинат с двух сторон, а удар шара было смоделировано в центре пластины. В работе композит моделировался в трехмерной постановке в рамках физической линейно-упругой постановки. Взаимодействие шарика и композита проводилось в рамках решения задачи одностороннего контакта по алгоритму «поверхность к поверхности». Спротивлением, предоставляемым воздухом во время удара, пренебрегали. Целью работы было исследование зависимости динамической деформации ламинированных стекел от кривизны стекла. Поведение влияния образцов ламинированного стекла с PVB прослойкой моделировалось с помощью переходного анализа. Исследование было проведено с использованием метода конечных элементов (МКЭ), с использованием гексагональной 8 узлового конечного элемента с 3 степенями свободы в каждом, в рамках 3D-моделирования и явного динамического подхода в современном программном обеспечении компьютерного инженерного анализа (CAE). Выполнен анализ сходимости размера сетки. В статье были проанализированы динамические деформации и напряженное состояние в ламинированных стеклах при различных параметрах кривизны ламината, выведены результаты прогибов, напряжений и деформаций в характерных точках в разные моменты времени, построены графики зависимости прогибов и деформаций от параметра кривизны стекла.

Ключевые слова: ламинированное стекло, ударная нагрузка, поливинил-бутиральная прослойка, явная динамика, напряженно-деформированное состояние.

O.I. SUKHANOVA, O.O. LARIN

ANALYSIS OF DYNAMICS OF LAMINATED GLASS COMPOSITE PANELS WITH DIFFERENT GLASS CURVATURE UNDER IMPACT LOADING

The article presents the results of the analysis of shallow shell laminated glass composites dynamic state under impact loading. The study considers modelling of a smooth steel ball drop on laminated glass with different curvature of laminate. The work includes modelling the composite in a three-dimensional setting as part of a physical linear-elastic state. The interaction of the ball and the laminate was carried out in the framework of solving the problem of one-way contact by the "surface to surface" (STS) algorithm. The resistance caused by air during impact was neglected. The aim of the work is to study the dependence of laminated glass dynamic deformation on the composite curvature. The article carries out modelling of behavior of the laminated glass samples with PVB interlayer using transient analysis. The study performs computations using a finite element method (FEM) using hexagonal FE with 8 nodes with 3 degrees of freedom in each within a 3D modelling and explicit dynamics approach in modern computer-aided engineering (CAE) software. The investigation includes a mesh-size convergence analysis. The work carries out the dynamic strain and stress state analysis in laminated glass with different parameters of laminate curvature, derives the results of deformation and strain in characteristic points at different time moments, plots the dependence graphs of deformation and strain on the parameter of glass curvature.

Keywords: laminated glass, impact loading, polyvinyl butyral interlayer, explicit dynamics, dynamic deformed state.

Вступ. Скло ламіновані панелі широко застосовуються у сучасній техніці. Це ілюмінатори, вікна автомобілів, зовнішні частини сонячних панелей, елементи будівельних конструкцій тощо [1-4]. Їх функціональним призначенням є захист інших чутливих елементів від зовнішніх факторів. Ламіноване скло складається з двох або більше стекол, ламінованих разом за допомогою одного або декількох шарів полімерної плівки (прошарків). Проміжний шар покращує механічні властивості: ударну міцність, в'язкість при руйнуванні, шумоізоляцію, теплоізоляцію тощо. Зі збільшенням площі удару існує можливість поліпшення ударостійкості. Найчастіше, як прошаркові матеріали [5-7], використовуються полівініл-бутиральна (PVB) плівка, етиленовий вінілацетат (EVA), іонопластові полімери, рідка смола з литим місцем (CIP) та термопластичний поліуретан (TPU). Ламіновані скляні композити під час своєї експлуатації, зазвичай, відчувають імпульсні, ударні навантаження, які викликані попаданням у них сторонніх предметів [1-4]. Руйнівна сила здатна завдати істотної шкоди, вивести з ладу системи в яких вони встановлені, або суттєво погіршити їхні функціональні характеристики.

Ударостійкість ламінованого скла вище, ніж у скляної пластини тієї ж товщини. Вивчення особливостей динамічної поведінки скляних ламінованих композитів під дією імпульсного та/або ударного навантаження – це важливе практичне завдання, результатом якого є рекомендації по внутрішній будові, технічні приписи на режими експлуатації, межі використання тощо. Ударна руйнівна поведінка ламінату є складною. Поєднані ефекти крихкості скла, нелінійна характеристика прошарку та адгезійне з'єднання значно ускладнюють поведінку пошкодження ламінованого скла. Аналіз відмов від впливу ламінованого скла зазвичай проводиться експериментально з подальшим числовим моделюванням або навпаки [8, 9].

Експериментальні дослідження є досить коштовними, через високу крихкість, оптичну прозорість, високу гладкість поверхні скла, мають суттєві обмеження по можливостям для використання експериментального обладнання. Попереднє розрахункове комп'ютерне моделювання дозволяє зменшити кількість необхідних експериментальних досліджень, сформулювати практичні рекомендації, визначити обмеження.

Більшість досліджень, відомих у літературі, були проведені для плоских пластин. Однак криволінійні композити представляють особливий інтерес, оскільки вони показують покращені додаткові функціональні та експлуатаційні характеристики, такі як аеродинаміка, висока вантажопідйомність тощо.

Криволінійні ламінати використовуються на практиці, та через відсутність інформації про їх структурну поведінку потрібно бути більш досвідченими. У наш час використання криволінійних композитів у сучасних будівлях зростає, оскільки їх можна формувати у різні форми вигину як проміжні матеріали. Загалом, криволінійні ламіновані стекла відрізняються від прямолінійних своєю початковою кривизною [10].

Таким чином, вивчення динамічної поведінки

криволінійних композитних скляних панелей під ударним навантаженням представляє особливий інтерес, якому присвячена ця стаття.

Постановка задачі. Метою даної роботи є дослідження динамічного відгуку ламінованих багатошарових скляних композитів із різним їх рівнем кривизни, що виникає внаслідок ударної дії від сталльної кулі та вивчення залежності рівня динамічних деформацій, що виникають у елементах даного композиту від умов впливу.

Наступні задачі поставлені в рамках цього дослідження:

1) змодельовати тришаровий скляний композит із різним рівнем кривизни;

2) розробити комп'ютерну математичну модель, яка дозволяє провести дослідження ударної взаємодії твердого тіла сферичної форми зі ламінатом;

3) провести комплекс чисельних досліджень стосовно визначення закономірності впливу параметрів падіння кулі на композит.

У даній статті розглянуто тришарове ламіноване скло зі різним рівнем кривизни. Параметр кривизни варіювався від 0 до 250 мм (тобто від прямолінійного ламінату до криволінійного у вигляді циліндричної оболонки з радіусом, рівним половині довжини сторони). Розглядався криволінійний композит, на який здійснювалась ударна дія через контакт з гладкою сталеву кулею діаметром 63,5 мм (1 кг) зі швидкістю 8 м/с. Композит представляє собою комбінування двох скляних пластин товщиною 3 мм кожна з прошарком PVB товщиною 0,38 мм між ними. Розмір пластин 500 × 500 мм.

Властивості матеріалу скла та прошарків взяті з даних виробників та перевірені початковими властивостями, розглянутими у статті Чанга та ін. [11] і приведені в табл. 1. Геометрична модель показана на рис. 1.

Таблиця 1 – Властивості матеріалу деталі

Матеріал	Густина, ρ (кг/м ³)	Модуль Юнга, E (Па)	Коефіцієнт Пуассона, ν
Сталь	7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,3
Скло	2500	$7 \cdot 10^{10}$	0,23
PVB	1100	$2,2 \cdot 10^8$	0,495

Розробка розрахункової моделі. Поведінка впливу зразків ламінованого скла з PVB прошарком моделювалася за допомогою перехідного аналізу в рамках 3D-моделювання та явного динамічного підходу методом скінченних елементів (МСЕ). Використовувався гексагональний SE з 8 вузлами із 3 ступенями волі в кожному.

Геометричні моделі композитів із різним рівнем кривизни представлені на рис. 1. Прямолінійний ламінат є окремим випадком криволінійних стекол з нульовим параметром кривизни ($c = 0$ мм), зображений на рис. 1, а, та один із криволінійних ламінатів ($c = 125$ мм), зображений на рис. 1, б, як приклад. Роз-

міри сторін у всіх моделях рівні ($a = 500$ мм).

В якості граничних умов, ламінат було зафіксовано з двох сторін, а удар кулі було змодельоване у центрі пластини, що показано на рис. 2. Композит моделювався в тривимірній постановці в рамках фізич-

ної лінійно-пружної постановки. Взаємодія кулі та композиту проводилось у рамках вирішення задачі одностороннього контакту за алгоритмом «поверхня до поверхні». Опором, що надається повітрям під час удару, нехтували.

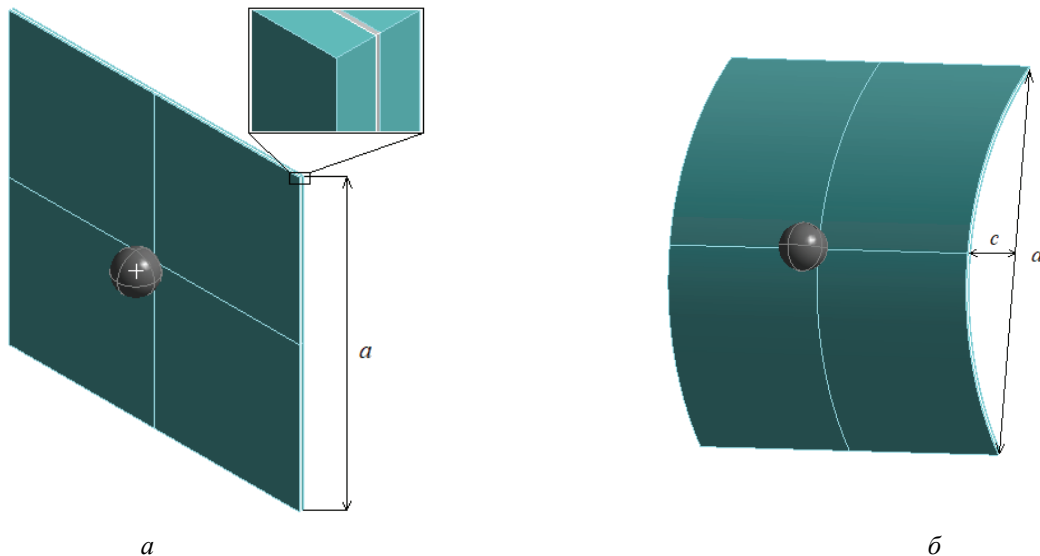


Рисунок 1 – Ламінат із різним рівнем кривизни (a – плоский, \bar{b} – криволінійний)

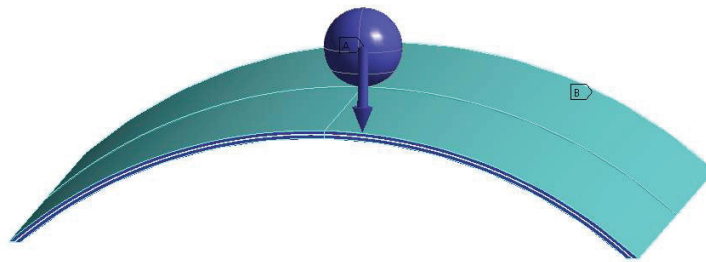


Рисунок 2 – Граничні умови (А – вектор початкової швидкості кулі, В – фіксована підтримка композиту)

Для досліджуваної прямолінійної моделі створено SE сітки з елементами різного розміру. Для кожного розміру сітки проведено розрахунки максимальних прогинів та максимальних еквівалентних напружень по Мізесу для визначення обчислюваної похибки. Проаналізовано модель ламінованого скла з PVB прошарком та різною швидкістю вільного падіння кулі. Аналогічні розрахункові дослідження для композиту з такими ж розмірами та умовами було вивчено у Ведртнама та Павара [5]. Найближче значення розміру сітки це 2 мм. Похибка між значеннями прогинів для розрахунків із сітками, які мають SE зі розмірами 5 мм та 4 мм, є досить великою і складає 24 %, але далі вона помітно зменшується до 3 % між сітками 4 та 3 мм, а між 2 мм та 1 мм взагалі складає 2,8 %.

Розрахунок нелінійної динаміки ламінованого скла. Було виконано розрахунок імпульсного навантаження стальної кулі на ламіноване скло з різним рівнем кривизни композиту. Виведено результати максимальних прогинів ($|u_{\max}|$), інтенсивних напружень

(σ_{int} визначається як найбільше з абсолютних значень $|\sigma_1 - \sigma_2|$, $|\sigma_2 - \sigma_3|$ чи $|\sigma_3 - \sigma_1|$) та інтенсивних деформацій (ε_{int} визначається як найбільше з абсолютних значень $|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$, $|\varepsilon_2 - \varepsilon_3|$ чи $|\varepsilon_3 - \varepsilon_1|$) у характерних точках (рис. 3) у момент часу t_0 (що відповідає максимальному прогину) і t_{\max} (що відповідає максимальному значенню напружень/деформацій на усьому проміжку часу). Обрана характерна точка H , де спостерігаються найбільші максимальні прогини та висока локалізація напружень, але відсутня сингулярність концентрації напружень, як у точці безпосередньої взаємодії ламінату з твердим шаром. Значення, що отримані в результаті розрахунку наведені у табл. 2.

На рис. 4 представлено прогини у прямолінійному на криволінійному ламінованому склі з PVB прошарком під дією ударного навантаження стальної кулі. Максимальний прогин спостерігається в зоні удару, а мінімальний – по зафіксованих краях моделі. Максимальне значення прогину зменшується із збільшенням параметра кривизни (рис. 5).

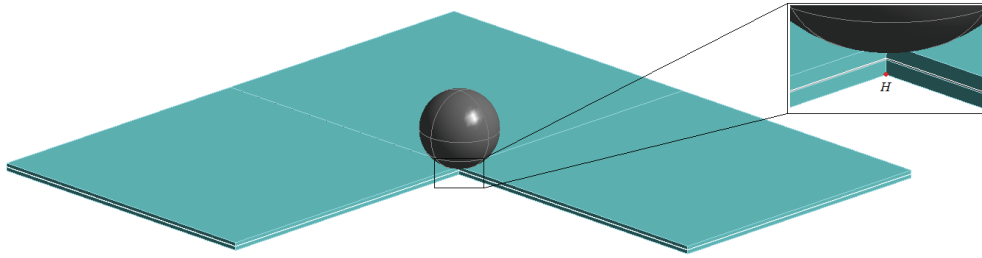
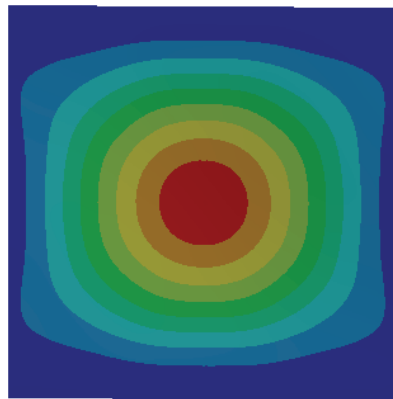
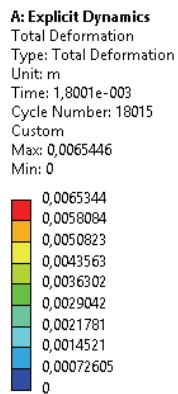


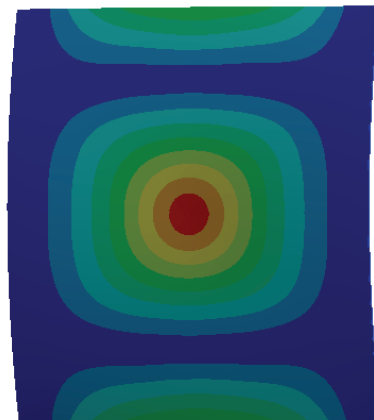
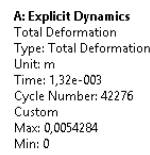
Рисунок 3 – Основні досліджувані точки моделі

Таблиця 2 – Результати розрахунку

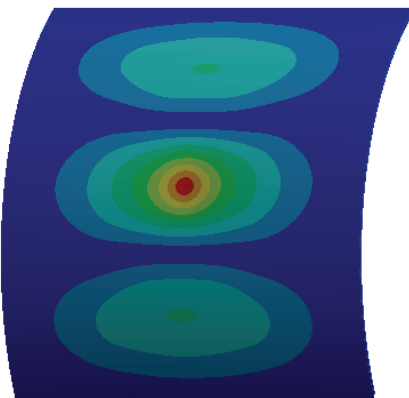
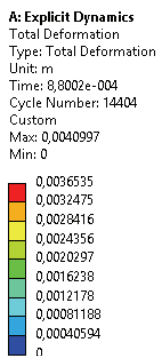
c (мм)	Розмір СЕ сітки (мм)	h_{bff} (мм)	u_{max} (мм)	Точка	σ_{int} у t_0 (МПа)	σ_{int} у t_{max} (МПа)	$\epsilon_{int} 10^{-3}$ у t_0	$\epsilon_{int} 10^{-3}$ у t_{max}
0	2	3000	6.5344	H	136.97	639.05	2.4067	11.229
31.25			4.9379		350	507.62	6.1501	8.9195
39.06			4.7335		420.63	551.29	7.3911	9.6869
46.88			4.4243		575.12	704.39	10.106	12.377
62.5			4.0641		640.41	744.65	11.253	13.085
93.75			3.6535		752.28	758.6	13.219	13.33
125			3.5504		684	710.06	12.019	12.477
187.5			3.3721		686.42	716.16	12.061	12.584
250			3.336		692.09	755.9	12.161	13.282



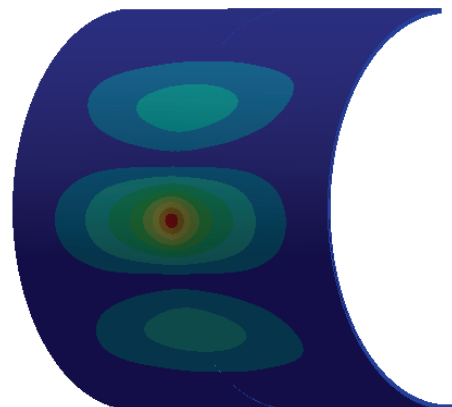
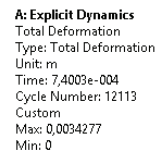
a



б



в



г

Рисунок 4 – Максимальні прогини у ламінованому склі
(a – $c = 0$ (мм); б – $c = 31$ (мм); в – $c = 94$ (мм); г – $c = 250$ (мм))

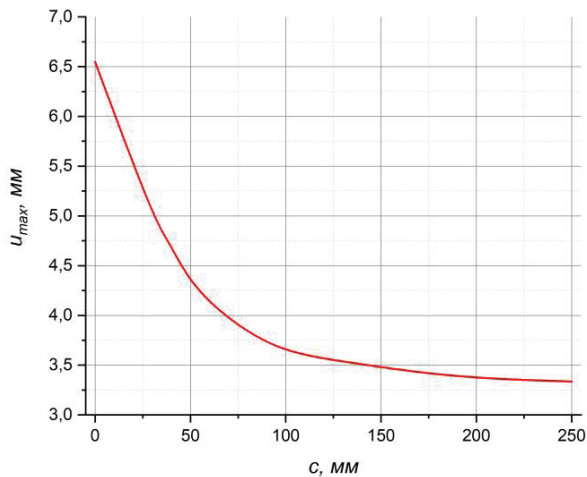
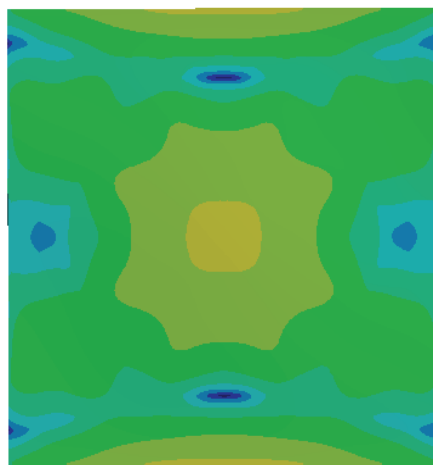


Рисунок 5 – Залежність максимальних прогинів у ламінованому склі від параметру кривизни

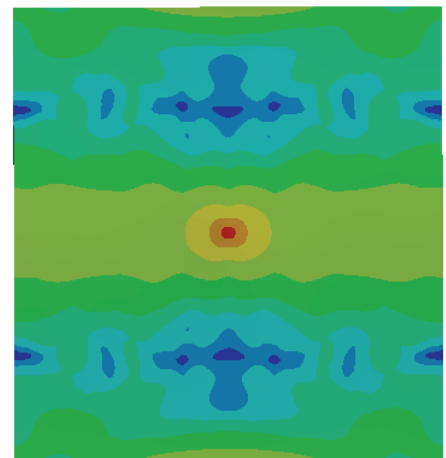
Розподіл інтенсивної деформації відображає, що максимальні значення розміщуються в зоні удару ламінату (рис. 6). Розглядається деформація в точці H при t_0 та t_{max} . Із збільшенням параметра кривизни значення інтенсивної деформації збільшується приблизно до 95 мм, а потім трохи зменшується у момент часу, що відповідає максимальному прогину (рис. 7). У момент часу, що відповідає максимальному значенню деформації на усьому проміжку часу значення деформації зменшується приблизно до 37 мм, а потім зростає приблизно до 95 мм, та залишається приблизно на одному рівні (рис. 8). З цих результатів можна побачити, що коли ламінат прямолінійний, деформація розподіляється по усій пластині, а при збільшенні параметра кривизни відбувається перерозподіл та локалізація інтенсивних деформацій.

A: Explicit Dynamics
Elastic Strain Intensity
Type: Elastic Strain Intensity
Unit: m/m
Time: 1,8001e-003
Cycle Number: 18015
Max: 0,058817
Min: 8,2986e-6



a

A: Explicit Dynamics
Elastic Strain Intensity
Type: Elastic Strain Intensity
Unit: m/m
Time: 2,3401e-003
Cycle Number: 23415
Max: 0,20778
Min: 2,3522e-5



б

Рисунок 6 – Інтенсивні деформації у прямолінійному ламінованому склі (*a* – у момент часу t_0 , *б* – у момент часу t_{max})

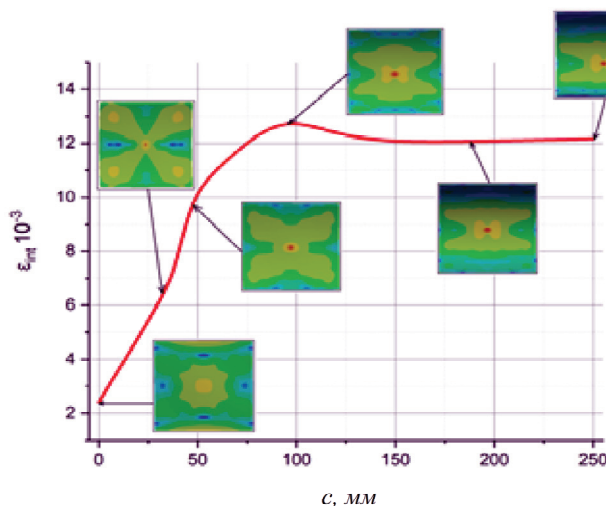


Рисунок 7 – Залежність інтенсивної деформації у точці H від параметру кривизни у момент часу t_0

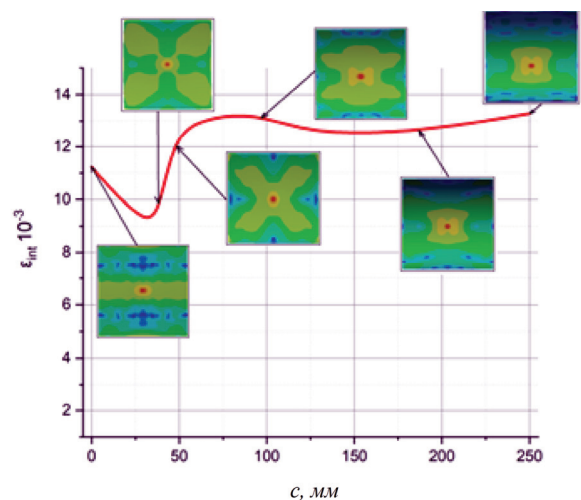


Рисунок 8 – Залежність інтенсивної деформації у точці H від параметру кривизни у момент часу t_{max}

Висновки. У даній роботі досліджено динаміку напружено-деформованого стану у ламінованому склі з різною його кривизною, що складалося з двох стекел товщиною 3 мм, ламінованих разом за допомогою

PVB прошарку товщиною 0,38 мм. Параметр кривизни варіювався від 0 до 250 мм (тобто від прямолінійного ламінату до криволінійного у вигляді циліндричної оболонки з радіусом, рівним половині довжини

сторони). Динамічне збудження формувалось внаслідок ударної дії на композит, що моделювалась як динамічна одностороння взаємодія з абсолютно твердим тілом сферичної форми діаметром 63,5 мм (1 кг) для імітації випробування удару кулі по композиту зі швидкістю 8 м/с вільного падіння.

Комп'ютерна математична модель була розроблена в рамках МСЕ у тривимірній постановці з явним моделюванням кожного структурного елементу композиту.

Варіювався параметр кривизни ламінату. Отримані та проаналізовані результати максимальних переміщень та інтенсивних деформацій. Результати показали, що розподіл максимальних переміщень та інтенсивних деформацій можна простежити уздовж ламінату із збільшенням параметру кривизни. Максимальне значення переміщення зменшується зі збільшенням параметра кривизни. Інтенсивні деформації розглядалися в точці H при t_0 та t_{\max} . Із збільшенням параметра кривизни значення інтенсивної деформації збільшується приблизно до 95 мм, а потім трохи зменшується у момент часу, що відповідає максимальному прогину. У момент часу, що відповідає максимальному значенню деформацій на усьому проміжку часу значення деформації зменшується приблизно до 37 мм, а потім зростає приблизно до 95 мм, та залишається приблизно на одному рівні. Коли ламінат прямолінійний, деформація розподіляється по усій пластині, а при збільшенні параметра кривизни відбувається перерозподіл та локалізація інтенсивних деформацій.

Список літератури

1. Астанін В.В., Бородачов М.М., Богдан С.Ю. Аналіз напружено-деформованого стану пластини в умовах ударного навантаження. Вісник НАУ. 2007. № 3-4. С. 63–77.
2. Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В., Шупіков О.М. Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багат шарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях. Вісник ХНТУ. 2016. № 3 (58). С. 408-413.
3. Борискіна І.В., Шведов Н.В., Плотников А.А. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий. Москва: АСВ, 2000. 176 с.
4. Shupikov A.N., Ugrimov S.V., Smetankina N.V., Yareshchenko V.G., Onhirsy G.G., Ukolov V.P., Samoilenko V.F., Avramenko V.L. Bird dummy for investigating the bird-strike resistance of aircraft components. Journal of Aircraft. 2013. Vol. 50, № 3. P. 817-826.
5. Vedrtam A., Pawar S.J. Experimental and simulation studies on fracture of laminated glass having polyvinyl butyral and ethyl vinyl acetate interlayers of different critical thicknesses due to impact load. Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A, 58(6), 2017. P. 169-178. <https://doi.org/10.13036/17533546.58.6.005>.
6. Morgan W.L. Manufacture and Characteristics of Laminated Glass. Industrial and Engineering Chemistry. 1931. № 23 (5). P. 505-508. <https://doi.org/10.1021/ie50257a008>.
7. Vedrtam A., Pawar S.J. Laminated plate theories and fracture of laminated glass plate. A review. Engineering Fracture

Mechanics. 2017. № 186. P. 316-330. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.020>.

8. Keller U., Mortelmans H. Adhesion in Laminated Safety Glass – What makes it work? Glass Processing Days. 1999. P. 13-16.
9. Vedrtam A., Pawar S.J. Experimental and Simulation Studies on Fracture and Adhesion test of Laminated Glass. Engineering Fracture Mechanics. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.044>.
10. Aşık M. Z., Dural E., Yetmez M., Uzhan T. A mathematical model for the behavior of laminated uniformly curved glass beams. Composites Part B: Engineering. 2014. № 58. P. 593-604.
11. Zhang X., Hao H., Ma G. Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact. Int. J. Impact Eng. 2013. № 55. P. 49-62.

References (transliterated)

1. Astanin V.V., Borodachov M.M., Bogdan S.Yu. Analysis of the stress-strain state of the plate under impact loading. Visnyk NAU. 2007. № 3-4. P. 63-77.
2. Smetankina N.V., Ugrimov S.V., Shupikov O.M. Mathematical modeling of non-stationary deformation process of multilayer glazing under distributed and localized force loads. Visnyk KhNTU. 2016. № 3 (58). P. 408-413.
3. Borisikina I.V., Shvedov N.V., Plotnikov A.A. Design of modern window systems of civil buildings. Moscow: ASB, 2000. 176 p.
4. Shupikov A.N., Ugrimov S.V., Smetankina N.V., Yareshchenko V.G., Onhirsy G.G., Ukolov V.P., Samoilenko V.F., Avramenko V.L. Bird dummy for investigating the bird-strike resistance of aircraft components. Journal of Aircraft. 2013. Vol. 50, № 3. P. 817-826.
5. Vedrtam A., Pawar S.J. Experimental and simulation studies on fracture of laminated glass having polyvinyl butyral and ethyl vinyl acetate interlayers of different critical thicknesses due to impact load. Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A, 2017. № 58 (6). P. 169-178. <https://doi.org/10.13036/17533546.58.6.005>.
6. Morgan W.L. Manufacture and Characteristics of Laminated Glass. Industrial and Engineering Chemistry. 1931. № 23 (5). P. 505-508. <https://doi.org/10.1021/ie50257a008>.
7. Vedrtam A., Pawar S.J. Laminated plate theories and fracture of laminated glass plate – A review. Engineering Fracture Mechanics. 2017. № 186. P. 316-330. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.020>.
8. Keller U., Mortelmans H. Adhesion in Laminated Safety Glass – What makes it work? Glass Processing Days, 1999. P. 13-16.
9. Vedrtam A., Pawar S.J. Experimental and Simulation Studies on Fracture and Adhesion test of Laminated Glass. Engineering Fracture Mechanics. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.044>.
10. Aşık M. Z., Dural E., Yetmez M., Uzhan T. A mathematical model for the behavior of laminated uniformly curved glass beams. Composites Part B: Engineering. 2014. № 58. P. 593-604.
11. Zhang X., Hao H., Ma G. Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact. Int. J. Impact Eng. 2013. № 55. P. 49-62.

Надійшла (received) 10.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Суханова Ольга Ігорівна (Суханова Ольга Игоревна, Sukhanova Olha Ihorivna) – аспірантка кафедри «Динаміка та міцність машин», НТУ «ХПІ». Тел.: +380502143998. E-mail: olha_sukhanova@ukr.net.

Ларін Олексій Олександрович (Ларин Алексей Александрович, Larin Oleksiy Oleksandrovych) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри «Динаміка та міцність машин», НТУ «ХПІ». E-mail: alexeya.larin@gmail.com.